

Para un futuro que permita un manejo diferenciado del producto tanto en el campo como en la industria

La agricultura de precisión y las TICs en la recolección mecanizada de tomate

Las tecnologías de la información y la electrónica avanzada se están implantando en la maquinaria agrícola de forma generalizada, y la recolección mecanizada del tomate ofrece interesantes retos a resolver.

C. Valero Ubierna¹, B. Diezma Iglesias¹,
L. M. Navas Gracia², G. Ruiz Ruiz²,
J. L. Llerena Ruiz³, D. Andújar Sánchez⁴.

¹Universidad Politécnica Madrid, ²Universidad de Valladolid,
³CTAEX, ⁴CCMA-CSIC.



El control de la calidad del producto que entra a la fábrica se realiza mediante muestreo a los remolques que llegan del campo.

El sector agroindustrial del tomate procesado español tiene una importancia económica y un reconocimiento mundial de primer orden. España (fundamentalmente Extremadura, Navarra y Andalucía) es el sexto país productor a nivel mundial, tras EE.UU. (California), China, Italia, Irán y Turquía. El periodo de recolección tiene lugar desde mediados de julio hasta finales de septiembre, muy intensificado durante agosto. En lo relativo a la transformación en puré de tomate, la región extremeña ocupa la primera posición europea, ya que procesa no sólo el tomate local sino el de otras regiones limítrofes.

El sector del tomate de industria ha estado sujeto a varias reformas en los últimos años. En 2001 tuvo lugar una reforma en la que se establecieron cupos de producción por país: debido a ello y teniendo en cuenta el asignado a España, 1.127 miles de t (lo que se venía produciendo en España hasta entonces), se

produjo en Extremadura un aumento desmesurado del número de fábricas para transformar tomate, especialmente por parte de las OPFHs (organizaciones de productores de frutas y hortalizas, veinte en el caso de la región extremeña) que decidieron montar sus propias industrias (quince entre Badajoz y Cáceres).

A partir de ese año, y con el objeto de que todas las fábricas de Extremadura fueran rentables, se fue aumentando la producción paulatinamente, sobrepasando el umbral fijado para España. Durante estos años no se aplicó penalización alguna a España por sobrepasar el umbral, debido a que otros países productores no alcanzaban sus propios umbrales y así se cubría la producción mundial prevista. Pero en 2004 todos los países productores obtuvieron excelentes cosechas, y además China contribuyó a la producción mundial con un gran volumen, por lo que se empezaron a aplicar las penalizaciones a España por superar el umbral, ocurriendo lo mismo en 2005, cuando aún se

aggravó más la situación, al producir España una cifra récord de 2,5 millones de t, que se correspondían con 29.600 ha de cultivo. Con estas grandes producciones de 2004 se saturó el mercado a nivel mundial, existiendo stock de producción en todas las industrias, lo que llevó a la caída del precio del producto y por tanto de la cuantía recibida por el agricultor. Esto se constató en la campaña de 2005 y a partir de 2006 se redujo la superficie cultivada y la producción, hasta 2008, en la que bajó hasta 23.637 ha y 1,5 millones de toneladas. La nueva situación de los mercados mundiales, así como el desacoplamiento propiciaron que en 2009 se cultivaran 26.056,65 ha y la producción obtenida fuese de 1.922.585,9 t, es decir, casi 2 millones de t. Las previsiones para 2010 son al alza en cuanto a superficie cultivada, aunque se estima que los contratos se cerrarán con precios más bajos que los de las últimas campañas (CTAEX Observatorio del tomate, 2009).

En la campaña 2008 entró en vigor la reforma de la OCM del tomate, y con ello el desacoplamiento parcial de las ayudas. Lo que significa que el agricultor percibió 1.138 € por hectárea cultivada de tomate de industria, como ayuda. Aparte de esta ayuda, los agricultores recibieron en 2008 por cada tonelada de tomate entregada en fábrica la cantidad de 75 € (0,075 €/kg), con unos rendimientos por hectárea medios de 62,22 t/ha. La campaña 2009 supuso un aumento importante de rendimiento 73,71 t/ha y un leve aumento del precio percibido por los agricultores 76 €/t, aunque las ayudas que percibieron los agricultores se redujeron a 793,11 €/ha.

A lo largo de estos años se han introducido mejoras sustanciales en lo concerniente al cultivo y al proceso de transformación del tomate de industria. No obstante, y dada la tendencia a la disminución de las ayudas por parte de Europa, es obligado reorientar la producción de tomate, de forma que este cultivo sea más competitivo. Desde este punto de vista, la automatización de las tareas de la recolección mecanizada, la optimización de las capacidades de trabajo de los medios mecánicos (tractores, cosechadoras, remolques), el control de la calidad y la producción en el mismo momento de la recolección (en lugar de la supervisión visual diferida), y la gestión de toda esa nueva información obtenida mediante tecnologías de la información (TIC) puede ser el punto de origen de una nueva filosofía productiva, más económica, más eficiente y más respetuosa con el medio ambiente.

Frutos electrónicos para la toma de muestras

Durante la recolección mecánica, los tomates sufren daños mecánicos que pueden dar lugar a heridas que facilitan la entrada de patógenos y reducen su vida comercial. Éste es uno de los puntos críticos de la recolección mecanizada de tomate.

Los estudios de las cosechadoras de tomate para localizar los elementos en los que se producen daños en el material vegetal, son una constante en la investigación de la maquinaria agrícola desde los años 60 del pasado siglo. Entonces, las investigaciones se limitaban a la toma de muestras de tomate en las diferentes partes de la cosechadora,



El fruto electrónico, una vez programado, se introduce en la maquinaria agrícola y va registrando en tiempo real los impactos que sufre, el momento del impacto y su magnitud (Imagen EPSH-UZA).

CUADRO I.

Valores medios de los impactos registrados por el fruto electrónico en las cosechadoras de tomate.

| Zona | Duración del impacto (ms) | Valor del pico de aceleración (g) |
|------|---------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 2,33 | 118,87 |
| 2 | 2,94 | 97,59 |

Fuente: Arazuri y col. 2001.

ra, para posteriormente, realizar una clasificación en función del número de frutos enteros, rajados o rotos. Sin embargo, los impactos que los tomates recibían durante su paso a través de la cosechadora eran difíciles de analizar, dada la inaccesibilidad de las distintas partes de la máquina durante su funcionamiento. La utilización de los llamados frutos electrónicos para la caracterización de las distintas partes de la máquina y de los puntos de transferencia entre elementos, ha supuesto un salto cualitativo que permite la clasificación de las cosechadoras atendiendo a su agresividad con el material vegetal. En esto ha sido pionero el grupo de Mecanización Agraria de la Universidad Pública de Navarra (S. Arazuri y col., 2001), que desde 1999 trabaja en la evaluación del funcionamiento de diversos modelos de cosechadoras de tomate.

Los frutos electrónicos se introducen dentro de la cosechadora como si fuesen un fruto más. Su forma esférica hace que se asemejen a un fruto real y en su interior disponen de un acelerómetro triaxial que registra la in-

tensidad de los impactos recibidos. Además posee un microprocesador, una memoria, un reloj y una batería interna recargable, lo que permite identificar las zonas de las máquinas donde dichos impactos se han producido.

Es de interés referir aquí un breve resumen de los resultados publicados por el grupo de la Universidad Pública de Navarra sobre los ensayos con frutos electrónicos IS-100 de 64 mm de diámetro. Se distinguen dos zonas en las cosechadoras: la primera comprende el peine, el separador y parte de la cinta de selección, y la segunda, el final de la cinta de selección, el elevador y la descarga sobre el palot o la bañera. Atendiendo a la duración de los impactos (menor duración, mayor agresividad) y al valor del pico de aceleración expresado en g, esto es, número de veces la aceleración de la gravedad (valores superiores a 50 g causan daños en los tomates), se concluye que la intensidad de los impactos es significativamente superior en la primera zona de la cosechadora. En el **cuadro I** se recogen los valores medios de estos parámetros de impacto para cada zona de la máquina.

El análisis del material vegetal tras su paso por cada uno de los elementos de las máquinas corrobora el resultado, indicando que son el sistema de corte y el sistema de elevación y separación algunos de los puntos críticos sobre los que realizar estudios para minimizar daños en la cosecha. Los autores señalan que no se han encontrado diferencias significativas entre los modelos de cosechadoras estudiadas.

Otros problemas operativos

La mecanización de la recolección del tomate para industria es total hoy en día (Arana, 2005), frente a la recolección manual del tomate para consumo en fresco. La maquinaria empleada es fundamentalmente de origen italiano o americano, con tecnología no muy evolucionada, desarrollada en los años 60-70 (Ruiz Altisent, 1975). Pese a disponer de un sistema electrónico de eliminación de terrones y tomates verdes, las cosechadoras siguen requiriendo de varios operarios para complementar la tarea de selección. De igual forma, no disponen de dispositivos capaces de registrar su funcionamiento para su posterior evaluación, o de auxiliar a los operarios (conductor, remolques, etc.) para mejorar su eficiencia.

Específicamente, conversaciones directas con productores e industriales nos han permitido identificar, entre otros, los siguientes problemas a resolver:

- ▶ El parámetro más importante por el que se fija el precio del tomate recolectado a la entrada de fábrica es el contenido en sólidos solubles (SS); actualmente inspectores designados por la Mesa del Tomate realizan un control manual de los remolques previo a la descarga. Si existiera una medición directa de SS durante el proceso de cosecha, o mejor, la posibilidad de realizar mapas en tiempo real del contenido en SS, la industria dispondría de una herramienta potente de mediación y planificación.
- ▶ Igualmente otro parámetro de calidad importante es la ausencia de podredumbres en los frutos, que puedan mermar la calidad final del concentrado. El desarrollo de un sistema de selección y eliminación de frutos podridos en la cosechadora supondría un avance definitivo.
- ▶ Lógicamente, la producción superficial (kg/ha) de cada parcela es un dato que interesa tanto al agricultor como al industrial. La posibilidad de cartografiarla en tiempo real en cada parcela también potenciaría la gestión y planificación de la producción, no sólo a nivel de precios, pagos y cupos de entrega, sino facilitando tareas posteriores como el control preciso de abonados, riegos, etc., para sucesivas campañas.
- ▶ Debido al creciente interés por los alimen-



Cosechadora autopropulsada de tomate para industria.

tos biofuncionales y la salud, existe una demanda de productos con licopeno (antioxidante) y de extracto puro del mismo, obtenido a partir de tomate. La medición directa del contenido en licopeno que va siendo cosechado generaría un valor añadido.

- ▶ Las cosechadoras actuales son bastante eficientes en lo relativo a eliminación de terrones y tomates verdes (producto a eliminar en la fábrica) gracias a su selector óptico electrónico. Sin embargo el agricultor espera un mejor funcionamiento de este dispositivo para evitar mano de obra adicional. Un sistema que optimice la separación de verdes y terrones a la vez que registre su trabajo sería idóneo.
- ▶ El proceso de cosecha requiere de una gran coordinación entre fábrica receptora, y agricultor que cosecha. El periodo de recolección es corto, la capacidad de la fábrica limitada y hay que evitar esperas de los remolques en la zona de descarga, ya que las altas temperaturas y la insolación reducen la calidad del producto. Además, el agricultor tiene que coordinar una o varias cosechadoras con una flota de remolques yendo y viniendo a cargar/descargar. Todo ello sugiere que un sistema de optimización del trabajo conjunto de remolques, cosechadoras y descarga en fábrica mejoraría la eficiencia del proceso. La incorporación de tecnologías de ayuda al guiado facilitaría la labor de los operarios.

- ▶ Es obligatorio para la empresa agrícola el registro de actividades para asegurar la trazabilidad. Las tecnologías de la información aplicadas al registro de todos los parámetros anteriores (y otros) resolvería la trazabilidad de una forma unificada. El intercambio de información mediante comunicación inalámbrica entre cosechadoras, remolques, tractores y la fábrica receptora crearía una red de elementos captadores/transmisores de datos en tiempo real.

Agricultura de precisión y TIC, la respuesta

Al mismo tiempo que se ha generalizado la recolección mecanizada, en los países más desarrollados ha aparecido la filosofía del manejo local específico (*Site Specific Management*; Lowenberg, 2000), que ha sido concebida como solución a la insostenible situación de la agricultura en los países más desarrollados: escasa rentabilidad de las explotaciones y elevados niveles de contaminación medioambiental (Lamo de Espinosa, 2001). El desarrollo de los sistemas de posicionamiento global (GPS) y la liberalización de la señal para uso público han permitido la transferencia de la agricultura de precisión (AP) al sector productivo.

La agricultura de precisión (AP) fue definida por Stafford (1997) como la técnica que caracteriza, a escala muy reducida (micropar-



Detalle de la zona de clasificación del producto a bordo de la cosechadora, y el selector óptico existente.

celas de 10-25 m²), la diversidad del medio físico (tipo de suelo, pendiente, contenido de humedad, contenido de nutrientes, etc.) y/o del entorno ambiental (infestaciones de malas hierbas, plagas, enfermedades, etc.) en el que se desenvuelven los cultivos. Hoy en día, son muchos países los que ya utilizan esta técnica, con Estados Unidos, Canadá, Australia, Argentina y Brasil, a la cabeza. En Europa, aunque algo menos extendida, es también ampliamente aceptada en muchos de los países. Alemania, Holanda, Bélgica, Reino Unido, Italia, Francia, e incluso en los países del Este (principalmente Ucrania) están familiarizados con esta técnica. En España, aunque los primeros trabajos de investigación comenzaron en los años 90, el número de agricultores que lo utilizan es aún muy escaso (Escribano, 2002; Valero, 2006).

Una de las razones de este retraso en la adopción de la AP y las TICs en España es el cuestionable beneficio económico en cultivos extensivos como los cereales, y la reducida superficie de las parcelas que limita las inversiones (Valero, 2007). Por el contrario, existen en nuestra agricultura cultivos con un excelente margen económico y que permiten su mecanización y automatización. Tal es el caso del viñedo, la remolacha, el olivar o los productos hortícolas como el tomate, para los que no existen equipos de AP desarrollados específicamente (Pérez et al., 2005). Sólo se conocen experiencias previas en toma-

te en el desarrollo de un monitor de rendimiento en California (Pelletier et al., 1999; Rosa et al., 2000). En estos casos, es necesario el desarrollo y adaptación de las tecnologías existentes, a las máquinas empleadas en estos cultivos. (Gil, 2008).

La información registrada por los sensores empleados en AP permite, a posteriori, la realización de mapas de rendimiento, su análisis e interpretación, la elaboración de resúmenes, y lo que es más relevante, la evaluación del rendimiento de las cosechas y de la variabilidad intraparcular. Esta variabilidad, combinada con otras fuentes de información: datos de las características físico-químicas de los suelos, datos del desarrollo y evolución de los cultivos, datos meteorológicos, etc., permiten optimizar el uso de los medios de producción: fertilizantes, productos fitosanitarios e incluso el agua de riego. De esta forma, se consigue incrementar la productividad y reducir el impacto medioambiental (Bongiovanni y Lowenberg-Deboer, 2004).

Hay que tener en cuenta también, que estas técnicas permiten decidir un manejo diferenciado del producto en el momento de la recepción en fábrica, pudiendo agrupar lotes de similares características para su procesamiento, con lo que el control sobre el proceso de concentrado será mayor, favoreciendo la elaboración de un producto uniforme. Adicionalmente, esta identificación y clasificación por lotes, supone una inestimable aportación a

los sistemas de trazabilidad de las industrias. De esta manera, se puede saber en todo momento los tratamientos realizados, los productos químicos y las cantidades aportadas, la fecha de aplicación, la máquina utilizada, el operario, etc., todo ello en cada punto de la parcela (Auernhammer, 2002).

A nivel mundial muchos son los avances conseguidos por las tecnologías englobadas bajo el denominador AP y TICs, que mejoran en conjunto la productividad agrícola, reducen costes y evitan deterioro ambiental. En nuestro caso, las tecnologías a emplear para resolver los problemas planteados pueden ser:

1. Creación de mapas de rendimiento de cultivos. Estos mapas de rendimiento se emplean habitualmente para estimar la capacidad productiva de cada zona de la parcela de cultivo, con el fin de aplicar en sucesivas campañas siembra y abonado con dosis variables de insumos (Birrel et al., 1996; Beck et al., 2001; Bachmaier, 2007). Existen también antecedentes en la aplicación de esta técnica en el cultivo del tomate (Pelletier et al., 1999; Rosa et al., 2000).
2. Detección de frutos no aptos (verdes, podridos, etc.) mediante visión artificial. Especialmente en aplicaciones en la industria de las frutas y hortalizas para el consumo en fresco, el uso de esta tecnología es habitual en las líneas de procesamiento (Aguilera, 2005; Kader, 2001).
3. Detección mediante visión artificial de plagas e infestaciones diversas, como malas hierbas. Muchos trabajos se han realizado para el control de malas hierbas en campos de cultivo, y de entre ellos destacamos los de Andújar et al. (2010), Marchant et al. (1995) y Brivot et al. (1996). Lee et al. (1999) que trabajaron en el control de malas hierbas en plantaciones de tomates.
4. Sistemas de ayuda al guiado de tractores, o de guiado totalmente automático, mediante tecnologías de posicionamiento global (GPS) o sistemas de posicionamiento local (LPS) (Keicher et al., 2000; Reid et al., 2000).
5. Cuantificación en línea del contenido en sólidos solubles (SS) para determinación de la calidad: el grupo LPF-TAG de la UPM ha desarrollado con éxito un sistema para determinación del contenido en



SS de uvas durante el proceso de vendimia mecanizada (Bastida *et al.*, 2007; Báguena *et al.*, 2009), que constituye un antecedente esencial para ser adaptado al caso del tomate de industria.

6. Sensores volumétricos para estimación del rendimiento productivo: ya se emplean con éxito en otros cultivos como el algodón, y se pretende adaptar un dispositivo similar a la clasificación de otros frutos en línea (Moreda, 2004).
7. Sensores acústicos para estimación del flujo cosechado y funcionamiento de la máquina: los dispositivos basados en sensores acústicos presentan la ventaja de poder adquirir información sobre el funcionamiento de múltiples subsistemas sin interferir físicamente con los procesos, lo que les hace especialmente interesantes en sistemas de control y supervisión tanto en entornos agronómicos (Marchant *et al.*, 2002; Chedad *et al.*, 2001; Schrevers *et al.*, 2001), como en otros entornos industriales (CSIRO, 2008; Tan *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2007). Por la relación con la presente propuesta, interesa resaltar aquí el trabajo de Marchant (2002) en el que se analiza la emisión acústica de los órganos de trabajo de una empacadora para la determinación de su capacidad de trabajo.
8. Sistemas de comunicación inalámbrica y RFID (*radio frequency identification*) para asegurar la trazabilidad: las comunicaciones y sensores instrumentados con RFIDs son empleados en agroalimentación con

éxito (Ruiz García *et al.*, 2007; Ngai *et al.*, 2008; Nadimi *et al.*, 2008) y específicamente en AP (Ampatzidis *et al.*, 2009) se pueden adaptar a la cosecha de tomate para el almacenamiento e intercambio de información.

9. Sistemas de información geográfica y servicios web asociados: las Administraciones están apoyando el uso de estándares internacionales, como los del Open Geospatial Consortium (OGC Website, OGC s.d.), mediante la creación de especificaciones y directivas como Inspire, surgida a partir de la Global Monitoring for Environment and Security (GMES). Ya se han aplicado en ocasiones los servicios web para integrar información de diversas fuentes y conseguir un derivado de valor añadido (Tu *et al.*, 2004; Gewin, 2004).

Además, la AP ofrece otras posibilidades técnicas, entre las que destacan:

- Creación de herramientas de diagnóstico remoto mediante teledetección (sensores aerotransportados o en satélites) que permiten realizar seguimientos de producciones, parámetros de cultivo e incluso enfermedades (Scharf *et al.*, 2000; Li *et al.*, 2000; Hendrickson *et al.*, 2000).
- Aperos de labranza instrumentados, con capacidad de variar la intensidad de la labor (Glancey *et al.*, 1996).
- Cuantificación mediante sensores en tiempo real de parámetros relacionados con la fertilidad del suelo: contenido en nutrientes, agua, materia orgánica o salinidad. De

entre los trabajos con este tipo de sensores, destacamos los de Shibusawa (1998), Newman *et al.* (1999) y Hummel *et al.* (2001).

- Control preciso y subparcelario de fitosanitarios (herbicidas, fungicidas o abonos), para su aplicación mediante tecnologías de dosificación variable (*variable rate application*, VR), sólo en los puntos donde son necesarios y en la cantidad prescrita (Whelan *et al.*, 1997; Stafford *et al.*, 2000).
- Irrigación diferenciada de precisión para diferentes unidades subparcelarias (Al-Ku-faishi *et al.*, 2009).

La I+D se dirige hacia la AP y las TICs

Todo ello ha motivado que muchos grupos de investigación dirijan su trabajo hacia la AP y las TICs. Por citar algunos españoles, hay varios grupos en los centros del CSIC como el CCMA, centros regionales como el CITTA o el IVIA, Universidades como la UdCoruña, USCompostela, UPValencia, UdLérida, UPCataluña, UCórdoba, UCastilla-La Mancha, UZaragoza, UPNavarra, además de la UPM y Uva. Internacionalmente son centros de prestigio el Institut für Landtechnik de München; el KVL en Dinamarca; la ENSAM-INRA, SupAgro en Francia; KUL en Bélgica; Purdue, Davis, Florida (EE.UU.); Cranfield, Edinburgh (Reino Unido); ACPA (Australia); o los INTAs argentino y uruguayo, entre otros muchos de una larga lista.

Las instituciones que firman el artículo piensan que merece la pena invertir esfuerzo y recursos en la línea de trabajo que se presenta en el mismo. De hecho dichas instituciones académicas ya disponen de material científico que podría usarse en campo para evaluar la viabilidad de estas propuestas. Actualmente otras entidades han expresado su interés en este particular, ampliando la trascendencia del trabajo aquí propuesto. Animamos a las empresas del sector que quieran sumarse a la iniciativa a que contacten con los autores. ●

Bibliografía ▼

Existe una amplia bibliografía a disposición de nuestros lectores que pueden solicitar a través del e-mail: redaccion@eumedia.es